

ческим взрывом Al и Ag проволок и исследованы физико-химические и антимикробные свойства продуктов реакции.

В зависимости от условий окисления могут быть получены наноструктурные частицы 3 морфологий, содержащие наночастицы серебра: агломераты нанолитов псевдобемита ( $\text{AGAIOOH}$ ) (рис. 1а); нанопластинки бемита ( $\text{HPIAIOOH}$ ) (рис. 1б) и гексагональные стержни байерита ( $\text{GSAI}(\text{OH})_3$ ) (рис. 1в).

Было показано, что синтезированные наноструктуры в области pH от 3 до 8 имеют  $\zeta$ -потенциал выше +30 мВ и имеют  $\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$  в области pH 9–9,3 (рис. 2). Синтезированные образцы преимущественно адсорбируют анионные красители. Максимальная адсорбционная емкость по эозину для  $\text{AGAIOOH}$  составила 17 мг/г, для  $\text{HPIAIOOH}$  – 3 мг/г и для  $\text{GSAI}(\text{OH})_3$  – 12 мг/г.

Наноструктуры с высокой эффективностью осаждают бактериальные клетки и проявляют бактерицидный эффект. Минимальная ингибирующая концентрация (МИК) наноструктур  $\text{AGAIOOH}$  по отношению к *E. coli* и *S. aureus* составила 1,25 мг/г. МИК  $\text{HPIAIOOH}$  и  $\text{GSAI}(\text{OH})_3$  по отношению к *E. coli* составила 2,5 мг/г. МИК  $\text{HPIAIOOH}$  по отношению к *S. aureus* составила 2,5 мг/г, а  $\text{GSAI}(\text{OH})_3$  – 5 мг/г.

### Список литературы

1. Lozhkomoev A., Pervikov A., Bakina O., Kazantsev S., Gotman I. // *RSC Advances*, 2018. – Vol. 8. – №63. – P. 36239–36244.
2. Jastrzębska A.M., Kunicki A.R., Olszyna A.R., Karwowska E. // *Advances in Applied Ceram-*

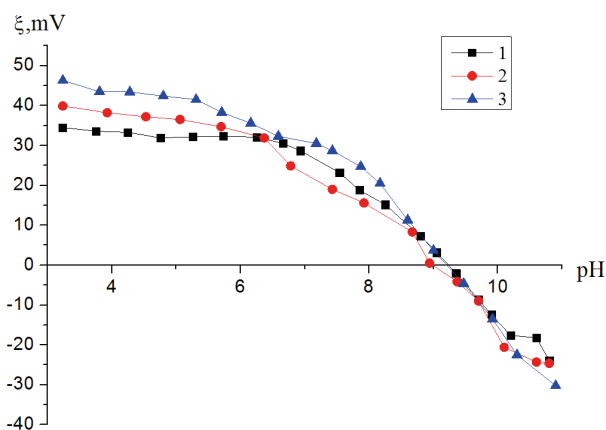


Рис. 2. Зависимость  $\zeta$ -потенциала от pH среды: 1 –  $\text{AGAIOOH}$ ; 2 –  $\text{HPIAIOOH}$ ; 3 –  $\text{GSAI}(\text{OH})_3$

Таким образом, полученные наноструктуры обладают мембранотропными свойствами и проявляют выраженную антимикробную активность за счет наночастиц серебра, иммобилизованных на их поверхности, что делает такие наноструктуры перспективными для разработки новых антимикробных агентов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2019-0033.

ics, 2011. – №2. – Vol. 110. – P. 108–113.

3. Jastrzębska A.M., Karwowska E., Olszyna A.R., & Kunicki A. // *Surface and Coatings Technology*, 2015. – Vol. 271. – P. 225–233.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ДИСПЕРСИОННОГО REMIX-ТОПЛИВА

А.А. Каренгин, И.Ю. Новоселов, В.И. Расторгуев  
Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент ИЯТШ А.Г. Каренгин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, karengin@tpu.ru

Дальнейшее развитие ядерной энергетики в России связано с использованием REMIX-топлива в виде сложных оксидных композиций (СОК), получаемых из неразделенных смесей водных нитратных растворов урана и плутония, образующихся при переработке ОЯТ, с добавлением растворов урана, обогащенных по изотопу уран-235 [1]. Это позволит повторно использо-

вать уран в виде изотопов уран-235 и уран-238, а также наработанный плутоний-239, что снизит потребление природного урана в ядерной энергетике. Однако у этого REMIX-топлива остается существенный недостаток – низкая теплопроводность.

К преимуществам плазмохимического синтеза СОК в воздушно-плазменном потоке из дис-

пергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны), водные нитратные растворы и имеющих низшую теплотворную способность  $\geq 8,4$  МДж/кг, следует отнести: одностадийность, высокую скорость, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, равномерное распределение и требуемый состав получаемых фаз без дополнительного водородного восстановления, низкие энерготрудозатраты [2].

Экспериментальные исследования процесса плазмохимического синтеза СОК «оксид самария–оксид неодима–оксид магния/оксид иттрия», имитирующих дисперсионное REMIX-топливо, проводились на плазменном модуле на базе высокочастотного генератора ВЧГ8-60/13-01» (рабочая частота 13,56 МГц, колебательная мощность до 60 кВт) на растворах ВОНР, включающих ацетон, водные нитратные растворы металла матрицы (магний, иттрий), а также самария (вместо плутония) и неодима (вместо урана), имеющих близкие физико-химические свойства с делящимися металлами.

Предварительно подготовленные растворы ВОНР подавались в диспергатор (300 л/ч) и далее в диспергированном виде в реактор, где в воздушно-плазменном потоке осуществлялся плазмохимический синтез СОК «оксид самария–оксид неодима–оксид магния/оксид иттрия» при температуре  $T_p = (1100 \pm 50)^\circ\text{C}$ . Контроль температуры осуществлялся высокоточным цифровым инфракрасным пирометром (IPE 140/45) по линии поглощения диоксида углерода. После реактора пыле-парогазовая смесь поступала в узел «мокрой» очистки для резкого охлаждения («закалки») с получением водных суспензий СОК, которые отстаивали, полученные осадки отде-

ляли, фильтровали и прокаливали 30 минут при температуре  $150^\circ\text{C}$ .

Показано, что увеличение массовой доли матрицы (MgO) от нуля до 50 % в составе СОК « $\text{Sm}_2\text{O}_3\text{--Nd}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ » приводит при расходе оборотной воды на «закалку» СОК ( $Q_{\text{ов}} = 2,8$  кг/с), частоте вращения ротора диспергатора ( $f_d = 35$  Гц) и  $\alpha = \text{Sm}_2\text{O}_3 / (\text{Sm}_2\text{O}_3 + \text{Nd}_2\text{O}_3) = 0,1$  к снижению размера частиц СОК в водной суспензии с 13,5 мкм до 4,3 мкм (лазерная дифракция). При этом удельная поверхность порошков СОК увеличивается с  $10,4$  м<sup>2</sup>/г до  $21,0$  м<sup>2</sup>/г, а размер кристаллитов в их составе снижается с 79 нм до 38 нм (БЭТ-анализ). При повышении частоты  $f_d$  с 35 Гц до 50 Гц увеличение массовой доли матрицы (MgO) в составе СОК от 10 % до 30 % (при  $Q_{\text{ов}} = 2,8$  кг/с,  $\alpha = 0,1$ ) приводит к снижению размера частиц СОК в водной суспензии с 9,4 мкм до 5,9 мкм, что позволяет утверждать, что полученные порошки также состоят из наноразмерных кристаллитов.

При увеличении массовой доли матрицы ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) от 10 % до 30 % в составе СОК « $\text{Sm}_2\text{O}_3\text{--Nd}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3$ » (при  $Q_{\text{ов}} = 2,8$  кг/с,  $f_d = 50$  Гц,  $\alpha = 0,1$ ) приводит к снижению размера частиц СОК в водной суспензии с 12,1 мкм до 11,2 мкм. При этом удельная поверхность порошков СОК увеличивается с  $5,5$  м<sup>2</sup>/г до  $7,8$  м<sup>2</sup>/г, а размер кристаллитов в их составе снижается с 147 нм до 115 нм.

Результаты исследований могут быть использованы при создании технологии плазмохимического синтеза наноразмерных сложных оксидных композиций для дисперсионного REMIX-топлива.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00136).

### Список литературы

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
2. Ivan Yu. Novoselov, Alexander G. Karengin, Renat G. Babaev. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conference Proceedings, 2018. – Vol. 1938, Article number 020016. – P. 1–5.